

九州工業大学学術機関リポジトリ



Title	コンピュータビジョンを利用したスケーリング実習評価システムの研究
Author(s)	黒岩, 恵
Issue Date	2015
URL	http://hdl.handle.net/10228/5445
Rights	

博士論文

コンピュータビジョンを利用した
スケーリング実習評価システムの研究

Dissertation
Doctor of Philosophy

A Study on a dental training evaluation system
for scaling and root planing using computer vision

黒岩 恵

学生番号 09584203

指導教員 タン ジュークイ准教授
石川 聖二 教授

九州工業大学大学院工学府
機械知能工学専攻 知能制御工学コース
平成 26 年度

目次

第1章	緒言	2
1.1	本研究の背景	2
1.2	本研究の目的	3
第2章	S R P 臨床シミュレーション実習	4
2.1	歯の部位・名称と歯面の表現	5
2.2	スケーラーについて	6
2.3	操作前の確認事項について	7
2.4	スケーラーストローク及び側方圧	8
2.5	S R P 臨床シミュレーション実習におけるシステム化の現状	9
第3章	既存の技術	10
3.1	医療実習装置及び医療実習結果の評価方法	10
3.2	拡張現実感（Augmented Reality：A R）	12
第4章	特許	14
4.1	特許の基本項目	14
4.2	特許の概要	15
第5章	スケーラーストローク表示システム	16
5.1	システム構成	16
5.2	カメラの校正と歪み補正カメラ	22
5.3	計算手順	23
5.4	仮想スケーラーの表示	25
第6章	評価実験	26
6.1	精度検証	26
6.2	開発システムにおける実証実験	28
第7章	結言	30
7.1	結論	30
7.2	今後の課題	30
参考文献/参考資料		31
謝辞		33
付録 A	CG 描画アプリケーションに対するカメラパラメータの設定	34

第1章 緒言

1.1 本研究の背景

人類史上最も感染者数が多い感染症は歯周病（歯肉炎や歯槽膿漏）といわれている[1]。歯周病は、歯と歯茎の間に繁殖する細菌により引き起こされ、歯の周りに炎症がおこる病気である。その進行が進むと、歯を支える土台の骨が溶けて歯が動くようになり、最後には歯が抜け落ちてしまう。また、歯周病菌やその毒素は、口から体内に侵入して、様々な全身疾患（狭心症・心筋梗塞・脳梗塞・糖尿病・肺炎・骨粗鬆症・腎炎・関節炎・低体重児出産・早産など）を引き起こす要因となっており、その予防や治療は、私たちの健康を保つ上で大切なことである。

歯周病の基本的治療は、スケーリング（歯に付着している歯垢や歯石の除去）やルートプレーニング（歯の表面のザラザラや、毒素や微生物で汚染された表層を除去する表面仕上げ）と呼ばれる治療であり、多くはスケーラーと呼ばれる金属刃のついた器具を使って、歯科医師や歯科衛生士が治療にあたっている。

スケーリング・ルートプレーニング（Scaling and Root planing：SRP）の治療・SRP技能の習得や教育は、歯科医師や歯科衛生士を養成する歯科系の学校（歯学部歯学科、口腔保健学科や歯科衛生士専門学校）で行われている。臨床実習（患者実習）の前に行われる基礎教育実習では、SRP技能を身に付けるために、顎模型付マネキン（ファントム）を使用したSRP臨床シミュレーション実習が行われている。

文献[2]によれば、それらの実習評価は、主に指導教員の見回りによる主観的な確認評価が現状であり、SRPでの下記5項目など細部にわたる学生の行動は、記録に残されておらず、技能の習得度や技能評価が十分なされていないとの指摘がある。

学生のSRP実習において身につけるSRP技能は、

- ①患者に対する術者のポジショニング
- ②歯の部位や歯面の治療処置に応じたスケーラー及びワーキングエンド(刃部)の選択
- ③ミラーテクニック
- ④スケーラーのストローク（歯に対する刃部の向きや刃部の動き）
- ⑤スケーラーの側方圧

等が挙げられる。

1.2 本研究の目的

本研究では、直接カメラでとらえることができない、スケーラーのワーキングエンド（刃部）の動きを可視化するシステムの開発を行う。このアイディアは、術者が使用しているスケーラーの動きをモバイルカメラで撮影すること、及びスケーラーに取り付けられたマーカを用いて、スケーラーの3次元位置や姿勢を推定し、その動きを復元することにある。また、復元したスケーラーをビデオ画像に重ね合わせることで、術者や指導教員がスケーラーの動きを観察することも可能である。また、本開発システムは、下記の特徴を有している。

- ① 低コストかつ手軽に入手可能な装置であること。
- ② 十分な精度で表示できること。
- ③ 使いやすく柔軟なシステムであること。
- ④ カメラは1台で構成すること。
- ⑤ タブレットパソコンを使用して構成すること。
- ⑥ 動きを記録に残せること。

第2章 S R P臨床シミュレーション実習

S R P臨床シミュレーション実習は、Fig.1 に示すように、顎模型付マネキンを用いて、臨床で使用するものと同じスケーラーやデンタルミラーを使用して実施されている。

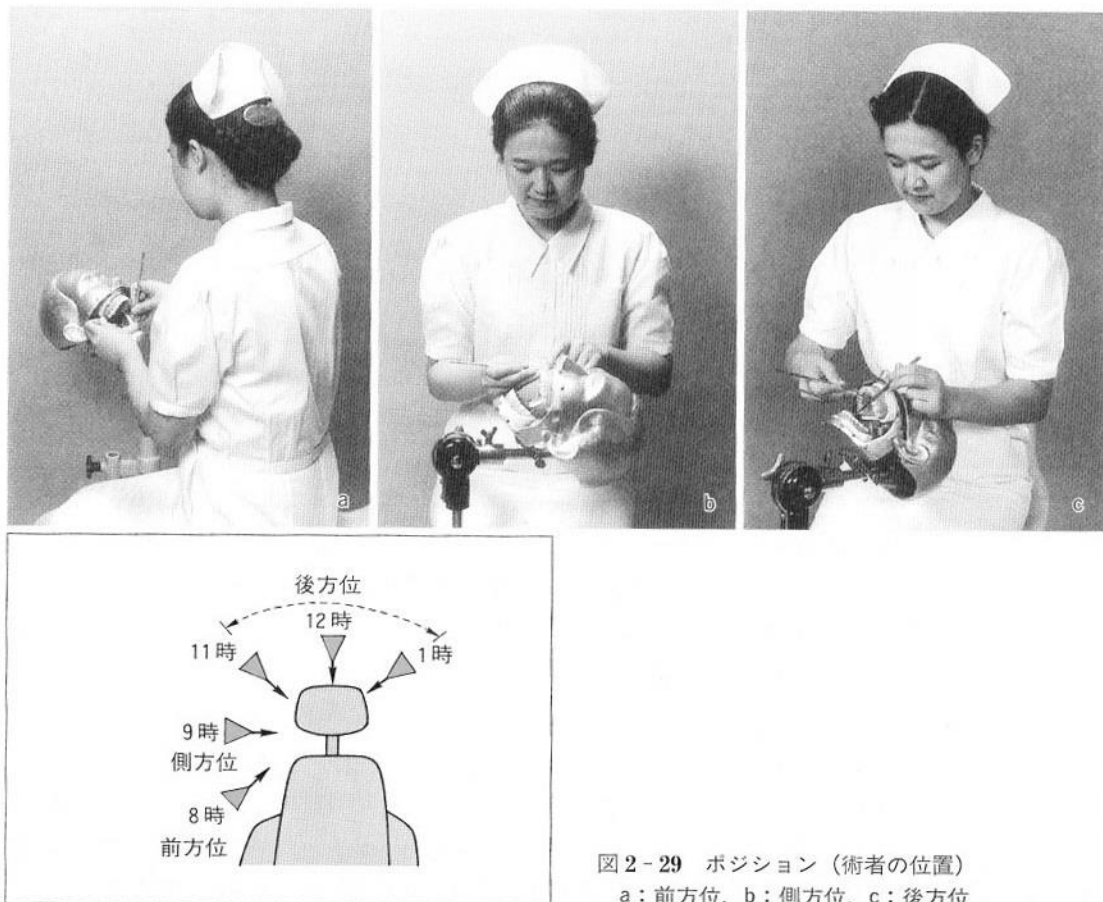


図2-29 ポジション（術者の位置）
a：前方位，b：側方位，c：後方位

Fig. 1 S R P臨床シミュレーション実習の様子

※[3]より転載

2.1 歯の部位・名称と歯面の表現[5,6]

成人の歯である永久歯の場合，その各部位を1～8の番号で Fig.2 に表す．前歯は中切歯（1），側切歯（2），犬歯（3）と呼ばれている．臼歯は，小臼歯と大臼歯があり，前から順に第1小臼歯（4），第2小臼歯（5），第1大臼歯（6），第2大臼歯（7），第3大臼歯（8）と呼ばれている．また，歯面は，口びる側を唇側，上顎の内側を口蓋側，下顎の内側を舌側と呼ぶ．また，正中に向かう側を近心，反対側を遠心と呼ぶ．

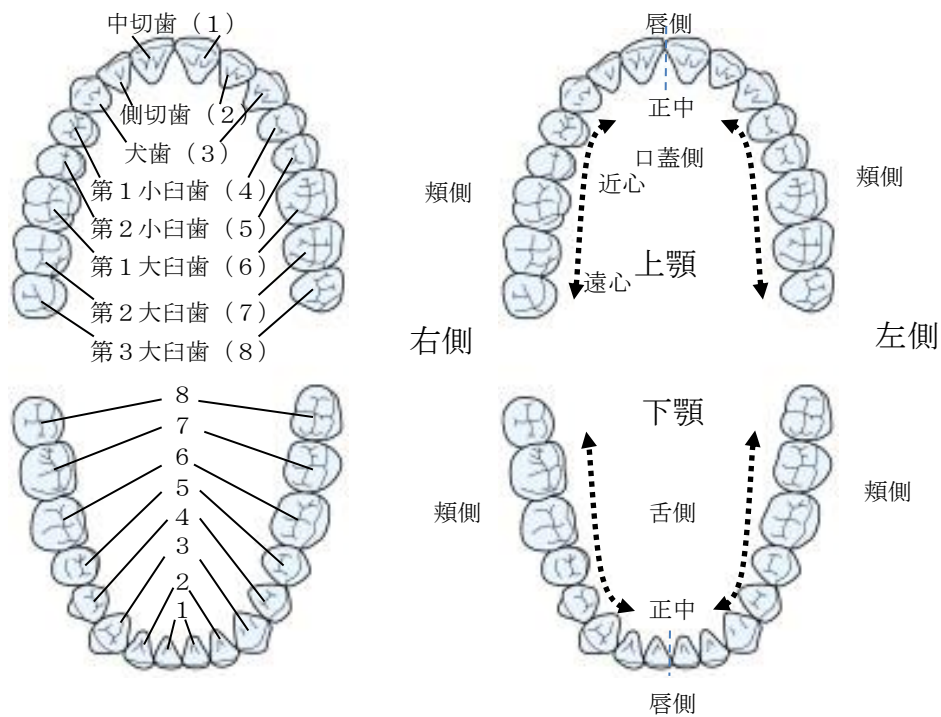


Fig. 2 歯の部位・名称と歯面の表現

2.2 スケーラーについて[3,4]

実習で使用するスケーラーは、ワーキングエンドの違いによりシックルタイプ(鎌形)とキュレットタイプ(匙型)に分類される。

スケーラーの構成は、Fig.3に示すように、手指で把持する部分A：ハンドル(把柄部)、及びハンドルとD：ワーキングエンド(刃部、作業端)とを結合させている部分B：シャンク(頸部)からなる。C：ローワーシャンクは歯面に合った屈曲となっている。

シックルタイプのスケーラーのワーキングエンドは、先が尖っておりチップと呼ばれ、スケーリング時に使用する。キュレットタイプのスケーラーのワーキングエンドは先が丸くなっておりトゥと呼ばれ、ルートプレーニング時に使用される。

また、Fig.4に示すように、異なる屈曲のローワーシャンクのスケーラーがある。これらのスケーラーは、歯の部位や歯面によって使い分けられる。

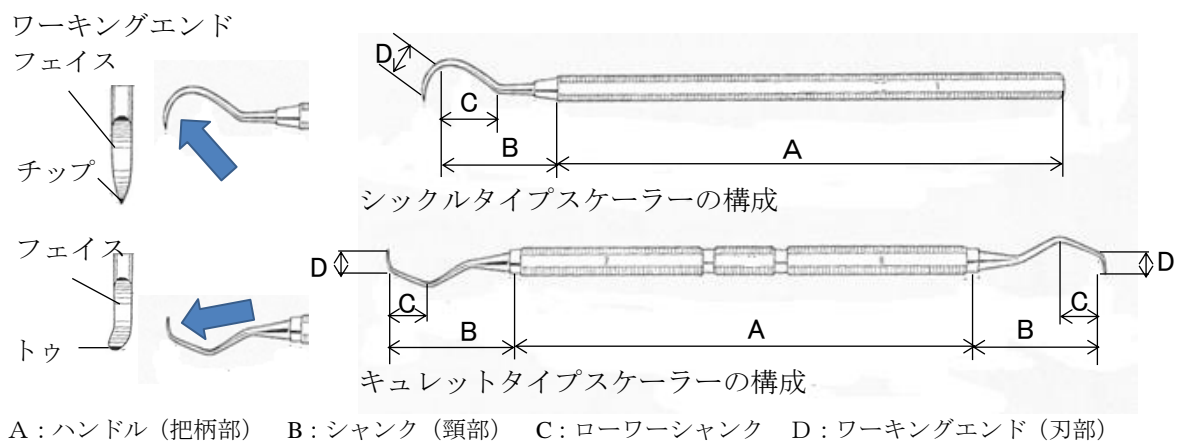


Fig. 3 スケーラーの構成

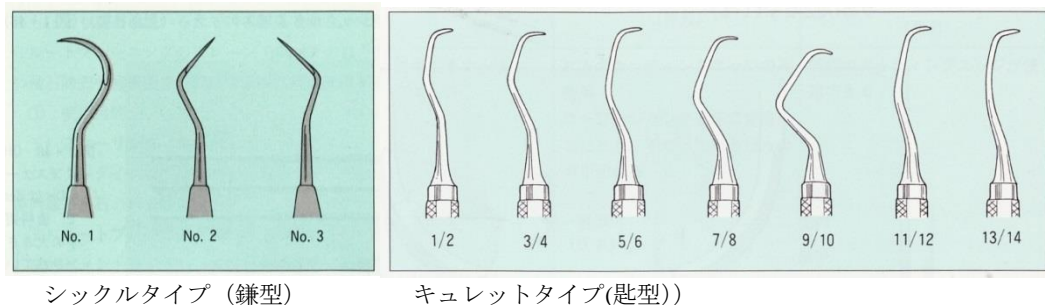


Fig. 4 シャンク(頸部)の異なるスケーラー

※[3]図 1-44, 図 1-52 より転載

2.3 操作前の確認事項について[3,4]

実習では、最初に以下の項目について確認した上で、実際の操作に入る．

- ① 治療方法（スケーリングまたはルートプレーニング）
- ② 部位の選択
- ③ 歯面の選択
- ④ ポジショニング
- ⑤ スケーラー及びワーキングエンドの選択
- ⑥ ミラー選択の有無
- ⑦ 固定点の確保

①～③の項目が決まると、所定の治療位置に着いた（ポジショニング）後、マネキンの前後傾斜角（マキシラアングル）や頭部の側方回転角（ヘッドローテーション）を調整する．

次に、所定のスケーラーやミラーを持ち、固定点を確保した後、スケーラーの操作（スケーラーストローク）を行う．

2.4 スケーラーストローク及び側方圧[4]

歯学療法指針[4]によれば、側方圧とは、SRPや歯石を探索する場合の、ワーキングエンドを歯に押し付ける力であり、歯石を探索する場合は弱い側方圧、スケーリングの場合は中程度の側方圧、ルートプレーニングの場合は、弱い側方圧をかける。また、強く強固に付着している歯石を除去する場合は強い側方圧、もろい歯石を除去する場合は中程度の側方圧をかける。

スケーラーストロークを行う場合は、歯面とワーキングエンド（刃部）の関係を十分理解し、歯茎などを傷つけないよう配慮することが重要である。例えば、キュレットタイプのスケーラーを用いてルートプレーニングを行う場合は、Fig.5 に示すように、歯面とワーキングエンド（刃部）の角度に注意しながら、2mm 程度のストローク動作を行う。

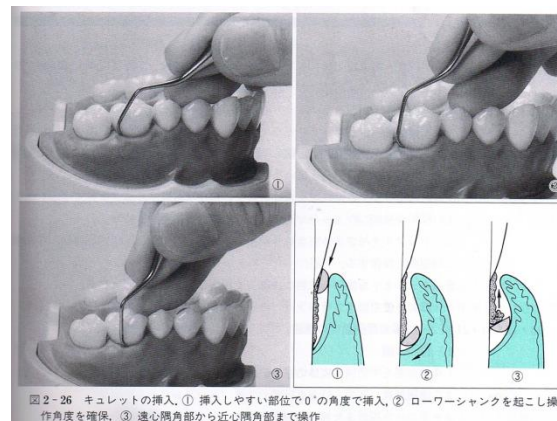


Fig.5 ルートプレーニングを行う際のストローク動作

※[3]より転載

2.5 SRP臨床シミュレーション実習におけるシステム化の現状

歯周療法学における臨床シミュレーションシステムは、直接カメラでとらえることができる項目を中心に、東京歯科大学によりコンピュータビジョンを用いた評価システム（2.3①～③に対応）が提案されている[2].

2.3④のスケーラーストロークにおいて、スケーラーの刃先は、口の中、特に歯茎と歯の間にあるので、術者本人だけでなく、指導教員にとってもその動きは直接見ることができず、指導や評価を行い難い項目である.

2.3⑤のスケーラーの側方圧は、スケーラーを歯に押し付ける力であり、ストロークの種類（探索・スケーリング・ルートプレーニング）や歯石の硬さによって使い分ける必要がある. 側方圧は、術者本人しかわからず、指導や評価を行い難い項目である.

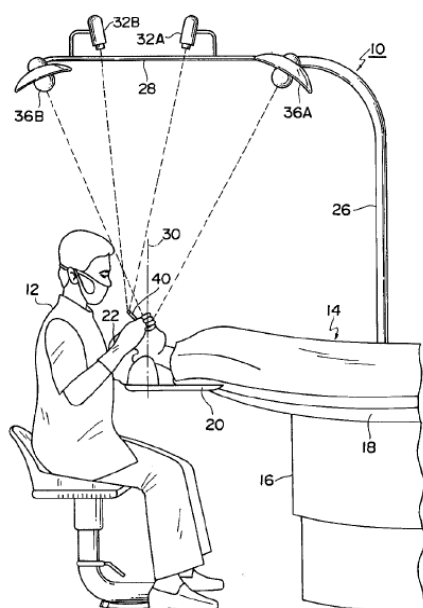
第3章 既存の技術

3.1 医療実習装置及び医療実習結果の評価方法[8]

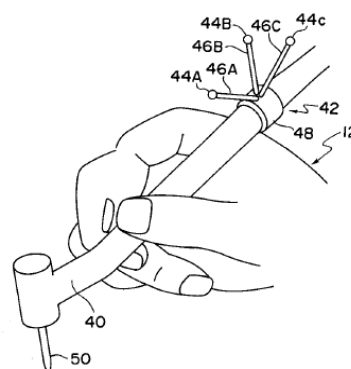
Fig.6 は、特許[8,9]に記載されている代表的な図である。32A・B は撮像カメラ、44A・B・C はインスツルメント(40)の位置や姿勢を求めるためのマークとなるターゲットである。また、40・50 は、インスツルメント・切削器具となっているが、これをスケーラー・ワーキングエンドに置き換えると本論文で提案するシステムと同じような機能が実現できる。

インスツルメントに取り付けられた3つのターゲットを固定された2台のカメラで撮影し、世界座標系におけるターゲットの3次元位置を求める。次に、その3次元位置より、インスツルメントや切削器具の姿勢を求めることができる。しかしながら、特許[8,9]に記載されているシステムには問題点が多々ある。提案システムと特許[8,9]の違いを Table 1 に示す。

【図1】



【図2】



符号の説明

2 … 実習装置、12 … 実習者、32A、32B … 撮像カメラ、40 … インスツルメント、42 … 被写体、44A、44B … ターゲット、50 … 切削器具、52 … 歯牙

Fig.6 特許[8]の代表的な図

Table 1 特許[8,9]と提案システムとの相違点

	特許[8,9]	提案システム
座標系	世界座標系	カメラ座標系
カメラ	2台以上の固定カメラ 固定カメラの為、死角が多い	1台のモバイルカメラ マーカが見えるところにカメラを移動することができるので、死角がない
器具の姿勢検出	44A・B・Cのターゲットより、世界座標系の位置を検出し、器具の姿勢を計算	器具に取り付けられたマーカを検出し、カメラ座標系における器具の姿勢を計算
画像処理環境	点ターゲット検出のため、画像処理環境の構築が困難	マーク形状(五芒星)検出のため、画像処理環境の構築が容易
ハード構成	容易とは言えない	容易
コスト	安価とは言えない	安価

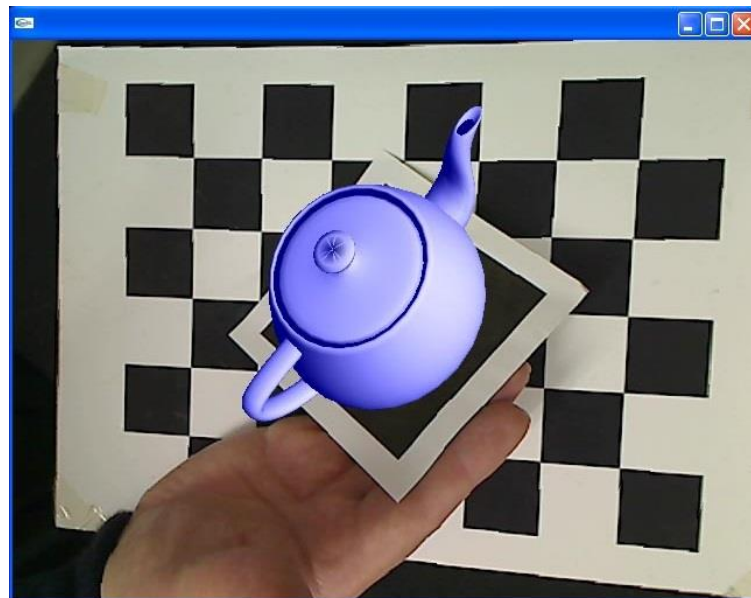
3.2 拡張現実感 (Augmented Reality : A R)

A Rとは、カメラで撮影した画像の中にコンピュータで構成した仮想物体を重ね合わせて表示する技術である。多くは、画面上に存在しない仮想物体を重ね合わせているが、提案システムでは、画面上に存在しているスケーラーと同じサイズ of 仮想のスケーラーを重ね合わせることで、口中や歯と歯茎の間にあり直接カメラでとらえることができないスケーラーのワーキングエンドやその動きを可視化する。

拡張実現感のアプリケーション用のライブラリとして ARToolKit[10,11]がある。このライブラリでは、Fig.7a に示すように正方形の黒い太枠のなかに、左右非対称のパターンが描かれたマーカーを使用している。この例では、「Hiro」が描かれている。このマーカーを含むようにカメラで撮影し、カメラ座標系における3次元位置を検出する。Fig.7b は、仮想物体をティーポットオブジェクトとした時の描画例である。



(a)



(b)

Fig. 7 ARToolKit におけるマーカー及び描画例. (a)代表的なマーカー, (b)描画例.

提案システムへの ARToolKit の適用は，2 値化を行う時に四角形パターンが出現しやすく誤認識が発生する問題がある．提案システムと ARToolKit との比較を Table 2 に示す．

Table 2 ARToolKit と提案システムとの比較

	ARToolKit	提案システム
座標系	カメラ座標系	カメラ座標系
カメラ数	1 台のモバイルカメラ	1 台のモバイルカメラ
マーク	正方形 (Fig.7a)	五芒星 (Fig.8a)
パターン	任意の非対称図形をパターンマッチングで特定	五芒星の 2 等辺三角形を二つ組み合わせた図形(Fig.8b)の塗りつぶし(Fig.8c)によるパターンの特定
表示物体	マーカールと異なる任意の仮想物体	マーカール (スケーラール含む)

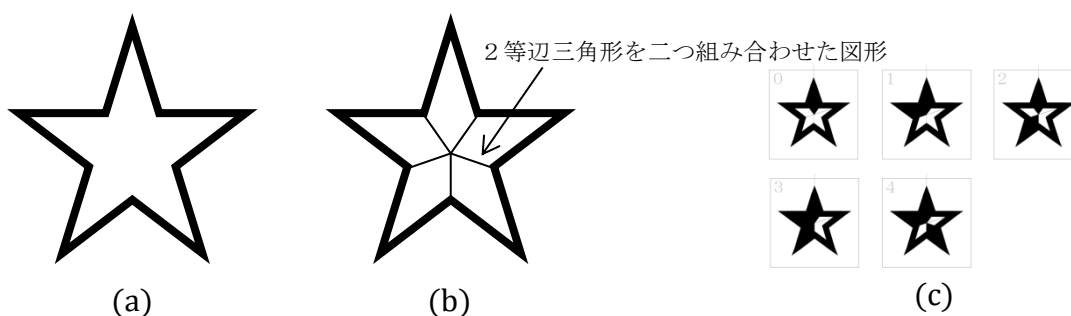


Fig. 8 提案システムのマーク及びマークパターン．(a)五芒星, (b)パターンの説明, (c)提案システムで使用するマークパターン．

第4章 特許

4.1 特許の基本項目

本研究の成果の一つとして、2011年12月2日に特許を出願した[13]. なお、2014年12月現在は審査中となっている.

特許の基本項目を Table3 に示す.

Table 3 特許[13]の基本項目（経過情報）

出願記事	特許 2011-265338 (平 23.12.2) 出願種別(通常)
公開記事	2013-117451 (平 25.6.13)
発明の名称	位置姿勢推定マーク、およびこれを用いた位置姿勢推定装置
出願人	株式会社恵夢工房
発明・考案・創作者	黒岩 恵、石川 聖二、タン ジュークイ、金 亨燮
公開・公表 I P C	国際分類 G01B 11/00 (2006.01) G01B 11/26 (2006.01) G09B 23/28 (2006.01)
出願細項目記事	査定種別(査定無し)

4.2 特許の概要

特許の課題は、「構成が複雑なものとなることを抑制するとともに、対象物の位置および姿勢を推定することができる位置姿勢推定マーク、およびこれを用いた位置姿勢推定装置を提供する」である。

また、その解決手段は、「解決手段として、位置姿勢推定装置 10 は、マーカー 33 を含む空間を撮像するカメラ 13 と、カメラ 13 を通じて撮像される撮影画像に基づいてマーカー 33 のカメラ 13 に対する相対的な位置および姿勢を推定する PC 14 とを備える。マーカー 33 を構成する面のうち予め定められた面には、四箇所以上の頂点を備える多角形からなるマークが付されている。PC 14 は、撮影画像からマークを抽出したか否かを判定するマーク抽出判定を行う。また、PC 14 は、マークを抽出したと判定したときに、マークを構成する各頂点の位置座標に基づいてマーカー 33 のカメラ 13 に対する相対的な位置および姿勢を推定する位置座標推定処理。」である。

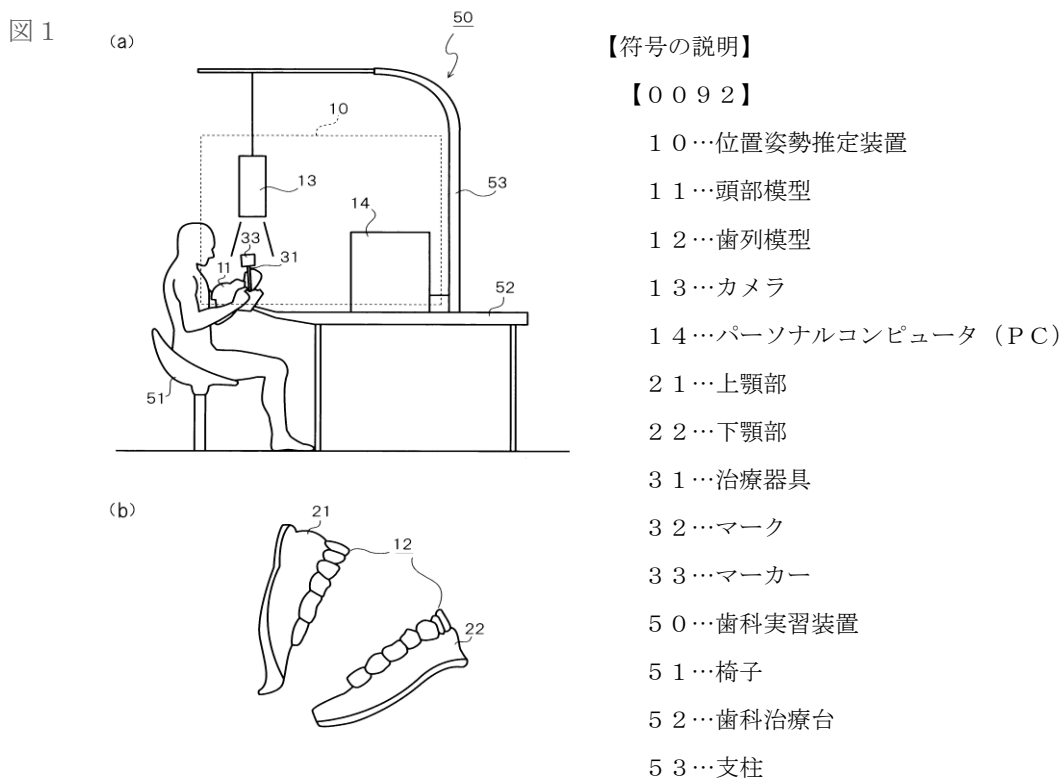


Fig. 9 特許[13]に記載の図（一部）

第5章 スケーラーストローク表示システム

5.1 システム構成

5.1.1 全体構成

Fig.10 に示すように、提案システムは、机に取り付けられた顎模型付マネキンと多面体マーカ付スケーラー、モバイルカメラ (Portable Webcam C905m:Logicool) とタブレット P C (Surface Pro 3 : Microsoft) から構成されている。Fig.11 は、表示画面の例である。右上画面では仮想スケーラーが実スケーラーに重畳して表示されている。

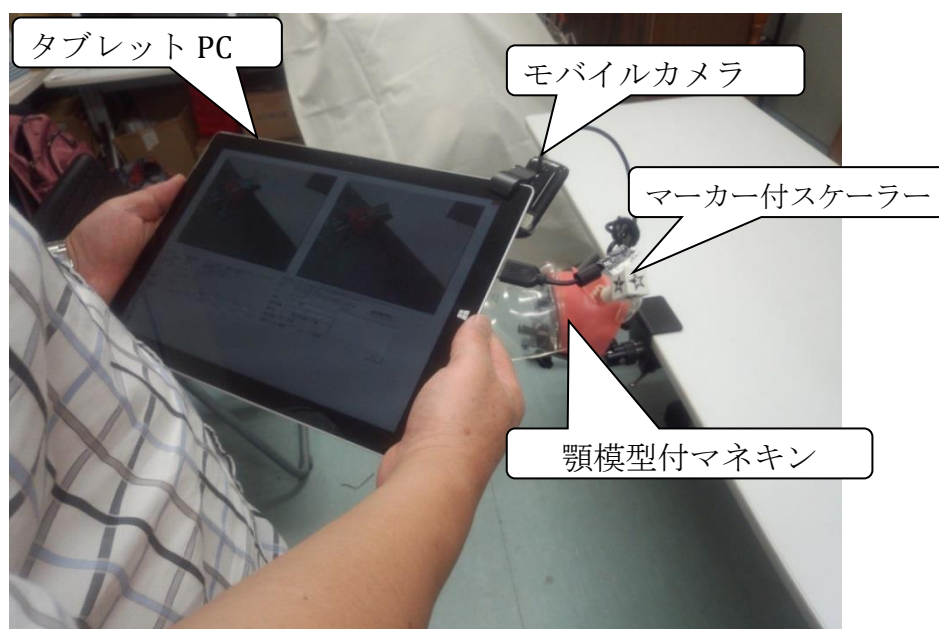


Fig. 10 全体システムの外観

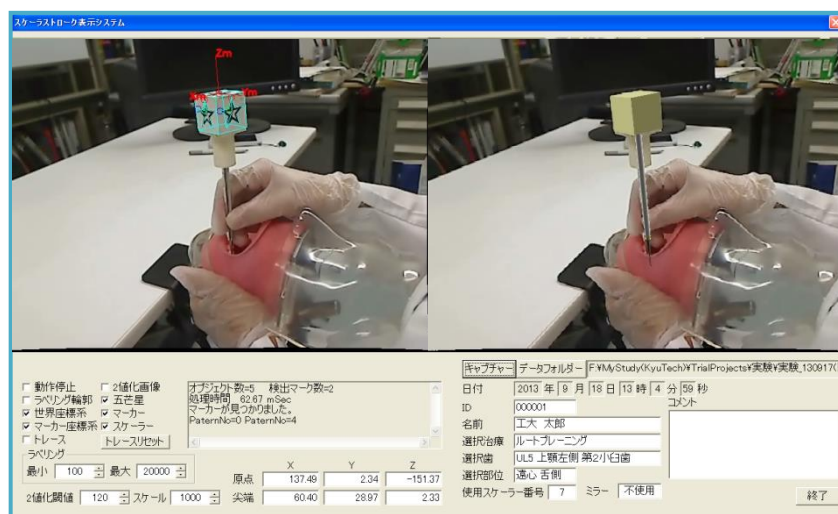


Fig. 11 表示画面例

5.1.2 多面体マーカ付スケーラー

提案システムでは、Fig.12 に示すように多面体（立方体）マーカ付スケーラーのトップに取り付けている。マーカサイズは図に示す通り（単位 mm）である。マーカの各面には、Fig.13 に示す5 パターンの五芒星が描かれている。五芒星の黒く塗りつぶされた部分の位置により、基準頂点（Reference Vertex）及び面を区別する。このマーカは ABS 樹脂製で、3D プリンターを用いて容易に作成できる。このマーカをカメラで撮影し、五芒星の頂点を解析することにより、カメラから見たマーカ付スケーラーの位置及び姿勢を計算する。

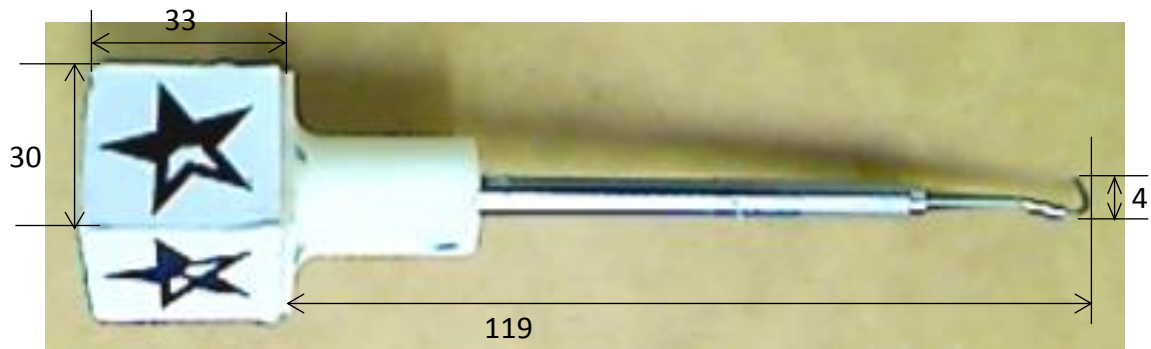


Fig. 12 多面体マーカ付スケーラー

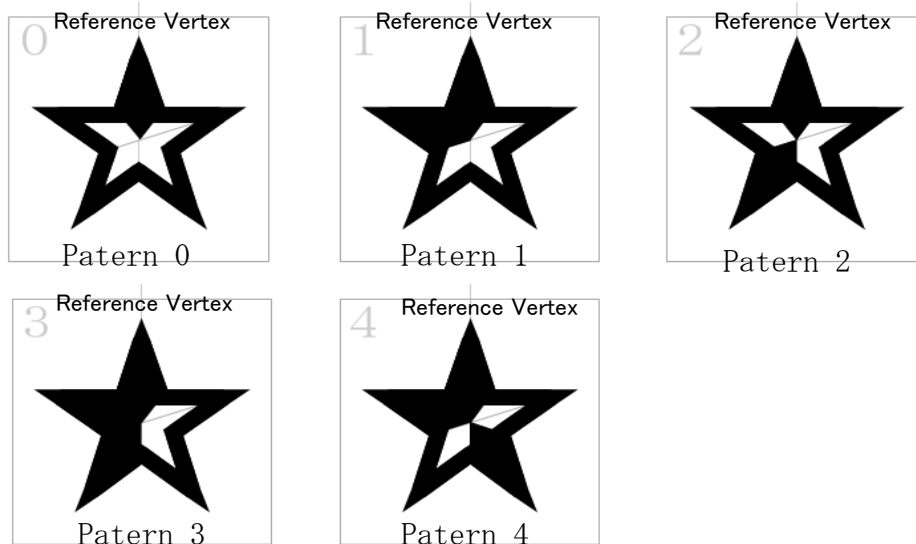


Fig. 13 5種類の五芒星パターン

5.1.3 処理の概要

Fig.15 は、提案システムの全体の処理手順である．以下に各手順を説明する．

① データ及びパラメータの初期化

カメラの内部パラメータ \mathbf{A} ，五芒星パターン，マーカー座標系における五芒星の頂点位置 $\mathbf{V}_{i,j} = [Vx_{i,j} \ Vy_{i,j} \ Vz_{i,j}]^T$ ($i = 0,1,\dots,5$ $j = 0,1,2,\dots,9$) およびスケーラー先端位置 $\mathbf{P}_t = [x_t \ y_t \ z_t]^T$ ，仮想スケーラー (Fig.14 参照) 等の設定を行う．

② 画像の読み込み

歪補正カメラより画像を取り込む．(Fig.16a 参照)

③ 五芒星の検出

(i) グレー化処理を行う．(Fig.16b 参照)

(ii) 2値化処理などの画像処理を行う．(Fig.16c 参照)

(iii) ラベリングを行う．(Fig.16d 参照)

(iv) 輪郭の点列を求める．(Fig.16e 参照)

(v) Douglas-Peucker のアルゴリズム[14]を用いて仮の頂点及び辺の点列を求める．

(vi) 頂点数が 10 かどうか，チェックする．

(vii) 各頂点の中心を求め，中心と頂点の長さを計算し，凸頂点・凹頂点が交互にあるかを調べ，星形かどうか，チェックする．

(viii) 五芒星の黒塗り部分パターンと一致するかチェックする．同時に，基準頂点も求める．

④ 五芒星の頂点計算

③の処理で求めた仮の頂点は，画像処理の過程で先端形状が不正確なことが多く，必ずしも確からしい頂点とは言えない．従って，辺の点列から両端の約 10%の点列を除外した点列とその延長にある辺の点列を使用し，隣り合う辺の交点を求め，頂点とする．(Fig.16f 参照)

⑤ ホモグラフィ行列及びカメラパラメータの計算

検出された五芒星がどのパターンであるかがわかれば，マーカーの面を見分けることができる．そこで，画像上の五芒星の頂点位置と①で設定された五芒星パターンの頂点位置よりホモグラフィ行列 \mathbf{H} を計算する．行列 \mathbf{H} は，マーカー座標系とカメラ座標系の関係を表しているので， \mathbf{H} から回転行列 \mathbf{R} 及び並進ベクトル \mathbf{t} を求めることができる．このようにして，カメラの外部パラメータ行列 $\mathbf{M} = [\mathbf{R}' \ \mathbf{t}]$ を得ることができる．

⑥ スケーラーの位置及び姿勢の計算

カメラから見たスケーラーの位置及び姿勢は，マーカーとスケーラーが一体となっているため，カメラの外部パラメータ行列 $\mathbf{M} = [\mathbf{R}' \ \mathbf{t}]$ で表すこと

ができる.

また, 世界座標系におけるスケーラーの先端位置 \mathbf{P}_w は, その同次座標表現を $\tilde{\mathbf{P}}_w = [x_w \ y_w \ z_w \ 1]^T$, 世界座標系からカメラ座標系への 4×4 の変換行列を \mathbf{E}_w , マーカー座標系からカメラ座標系への 4×4 の変換行列を \mathbf{E}_M , スケーラー先端位置 \mathbf{P}_t の同次座標表現を $\tilde{\mathbf{P}}_t = [x_t \ y_t \ z_t \ 1]^T$, スケール係数を s とすると, $s \tilde{\mathbf{P}}_w = \mathbf{E}_w^{-1} \mathbf{E}_M \tilde{\mathbf{P}}_t$ のように表すことができる.

⑦ 結果の表示

カメラ座標系によって記述された仮想スケーラーをリアルタイムで画面上のスケーラーの上に上書きし, 表示する.

⑧ 継続?

②～⑦を終了指示が入力されるまで繰り返す.



Fig. 14 仮想スケーラーとマーカー座標系.
トップ面の中央が原点.

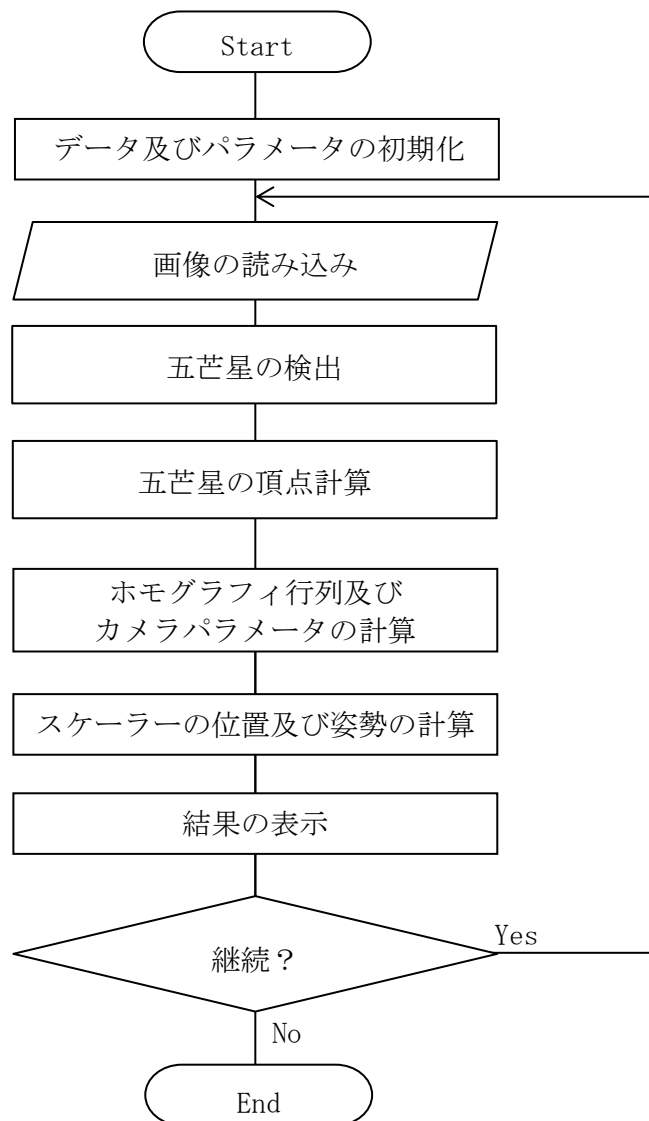


Fig. 15 処理のフローチャート



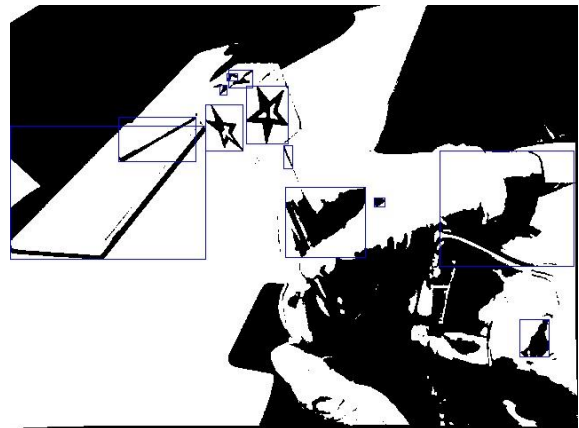
(a)



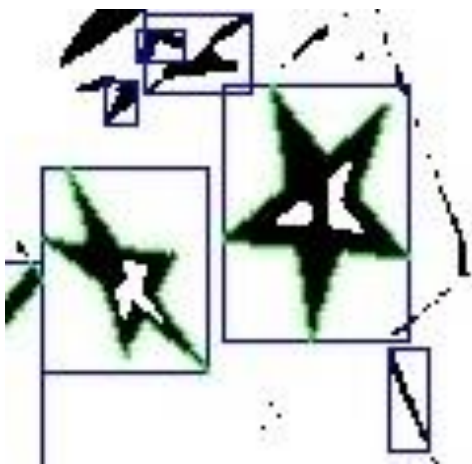
(b)



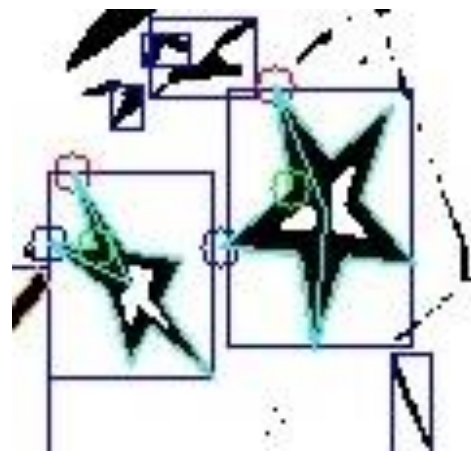
(c)



(d)



(e)



(f)

Fig. 16 画像処理.

(a)取得画像, (b)グレイ画像, (c)2 値画像 (閾値=110),
 (d)ラベリング処理画像 (ラベル数=12),
 (e)輪郭検出画像 (緑が輪郭), (f)五芒星検出画像.

5.2 カメラの校正と歪み補正カメラ

本システムのカメラ校正では、コンピュータビジョンライブラリ OpenCV[12,17]の関数を使用し、内部パラメータ及びレンズ歪補正係数を推定する．ここでは、内部パラメータの推定には Zhang の手法[15]，レンズ歪係数の推定には Brown の手法[18]に基づいた手法のものを使用している．

Fig.17に示す3次元位置が既知のチェッカー・パターンボードを使用し、このボードを多方面から撮影し、得られた画像内の特徴点をもとにカメラの内部パラメータ行列 \mathbf{A}' と歪補正係数 $\mathbf{\kappa} = [k_1 \ k_2 \ p_1 \ p_2]$ (k_1, k_2 は半径方向の歪み係数, p_1, p_2 は円周方向の歪み係数) を計算する．

さらに、歪補正カメラ画像（内部パラメータ行列 \mathbf{A}' と歪補正係数 $\mathbf{\kappa}$ を使用した補正画像）を使用して、内部パラメータ \mathbf{A} を計算する．

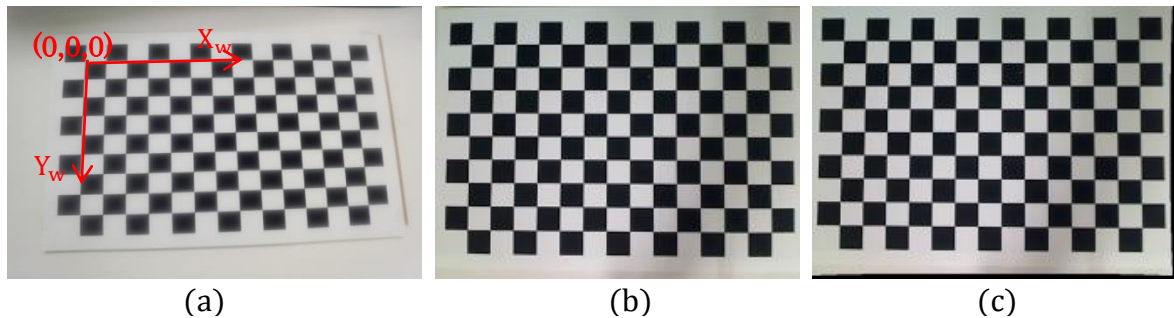


Fig. 17 チェッカー・パターンボード 9×14, 間隔 18.3mm

(a)実験で使ったチェッカー・パターンボード

(b)実カメラの画像 (c)歪補正後の画像 (歪み補正カメラの画像)

5.3 計算手順

A をカメラの内部パラメータ行列, M をカメラ座標系($O_C - X_C Y_C Z_C$)とマーカー座標系($O_M - X_M Y_M Z_M$)の関係を表す 3×4 の外部パラメータ行列とする.

外部パラメータ M は次のように記述できる.

$$M = [R \ t] = [r_1 \ r_2 \ r_3 \ t] \quad (5-1)$$

ここで, $R = [r_1 \ r_2 \ r_3]$ は回転行列, t は並進ベクトルを表す.

マーカー座標系における任意の点を P , 同次系を \tilde{P} , 画像に投影された点を p , 同次系を \tilde{p} とすれば, カメラモデルは次のように記述できる.

$$\lambda \tilde{p} = A M \tilde{P} = A [R \ t] \tilde{P} = A [r_1 \ r_2 \ r_3 \ t] \tilde{P} \quad (5-2)$$

ここで, λ は画像のスケール係数を表す.

点 P_0 がマーカーのトップ平面上の点, すなわち, マーカー座標系における $X_M - Y_M$ 平面上の点とすれば, $Z_i = 0$ より $\tilde{P}_0 = [X_i \ Y_i \ 0 \ 1]^T$ となる.

Z 成分を縮退させ, $\tilde{P}_0 = [X_i \ Y_i \ 1]^T$ に置き換えれば, 式(5-2)は次のようになる.

$$\lambda \tilde{p}_0 = A [r_1 \ r_2 \ t] \tilde{P}_0 \quad (5-3)$$

式(5-3)は, $X_M - Y_M$ 平面とカメラの画像平面との二つの平面関係を表しているので, 3×3 のホモグラフィ行列 H を用いれば次のように表現できる.

$$A [r_1 \ r_2 \ t] = H \quad (5-4)$$

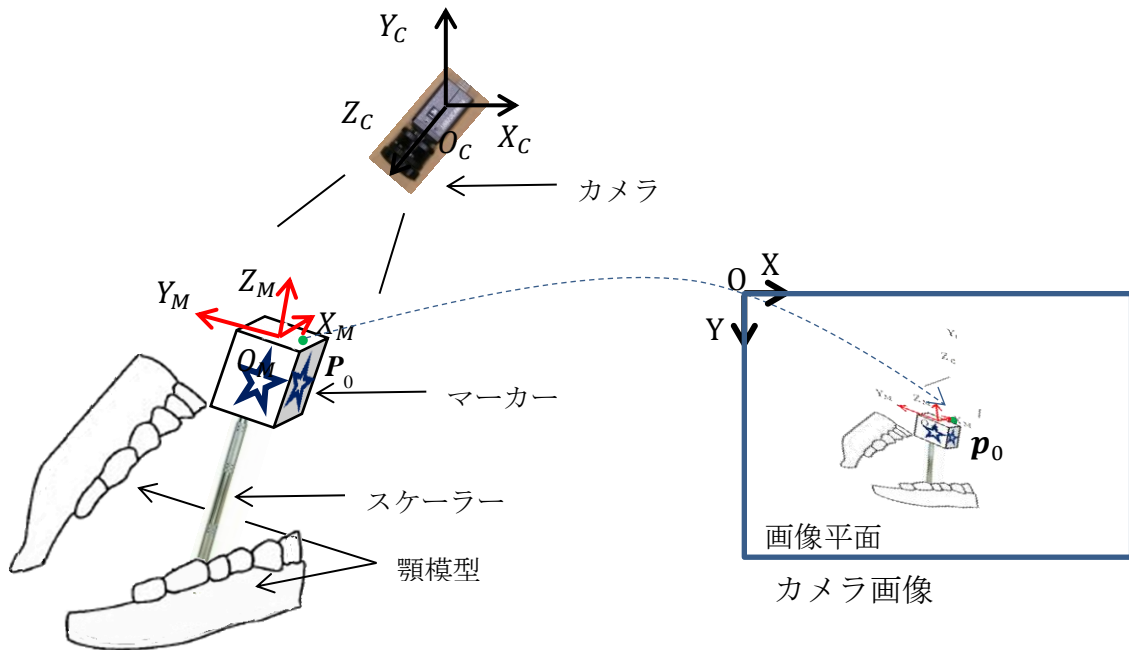


Fig. 18 マーカートップ平面上の点の画像平面への投影

ホモグラフィ行列 H は計算できるので、回転行列 $R = [r_1 \ r_2 \ r_3]$ と並進ベクトル t は次のように求められる。

$$[r_1 \ r_2 \ t] = A^{-1} H, \quad r_3 = r_1 \times r_2 \quad (5-5)$$

一般に、実際の値を用いて R を計算すると $R^T R = R R^T = I$ が成り立つ回転行列にならないことが多く、特異値分解を行って、新たな回転行列 R' を求める。すなわち R を特異値分解して、 $R = U D V^T$ (D は対角行列、 U, V はユニタリ行列) に変換し、 D を I に置き換え、これを新たな回転行列とする。すなわち次式で回転行列を定義する。

$$R' = U V^T = [r'_1 \ r'_2 \ r'_3] \quad (5-6)$$

従って、カメラ座標系 ($O_C - X_C Y_C Z_C$) とマーカー座標系 ($O_M - X_M Y_M Z_M$) の関係を表す 3×4 の外部パラメータ行列 M は、(5-5)、(5-6) 式より導かれる R' および t を使用すると、次のようになる。

$$M = [R' t] \quad (5-7)$$

世界座標系からカメラ座標系への 4×4 の変換行列を E_W 、マーカー座標系からカメラ座標系への 4×4 の変換行列を E_M とする。

$$E_M = \begin{bmatrix} r'_1 & r'_2 & r'_3 & t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-8)$$

また、3次元座標上の点 $P = [x \ y \ z]^T$ を同次座標表現 $\tilde{P} = [x \ y \ z \ 1]^T$ で表現し、世界座標系・カメラ座標系・マーカー座標系の点の同次座標表現を $\tilde{P}_W \cdot \tilde{P}_C \cdot \tilde{P}_M$ 、スケール係数を s, s_1, s_2 とすれば、以下の関係が成り立つ。

$$s_1 \tilde{P}_C = E_W \tilde{P}_W, \quad s_2 \tilde{P}_C = E_M \tilde{P}_M \quad (5-9)$$

すなわち、

$$s \tilde{P}_W = E_W^{-1} E_M \tilde{P}_M \quad (5-10)$$

世界座標系の点 \tilde{P}_W 、マーカー座標系の点 \tilde{P}_M 及び $F = E_W^{-1} E_M$ を

$$\tilde{P}_W = [x_W \ y_W \ z_W \ 1]^T, \quad \tilde{P}_M = [x_M \ y_M \ z_M \ 1]^T$$

$$F = \begin{bmatrix} f_{11} & f_{12} & f_{13} & f_{14} \\ f_{21} & f_{22} & f_{23} & f_{24} \\ f_{31} & f_{32} & f_{33} & f_{34} \\ f_{41} & f_{42} & f_{43} & f_{44} \end{bmatrix} \quad (5-11)$$

と置けば、世界座標系の点 P_W は、次式で与えられる。

$$P_W = \begin{bmatrix} x_W \\ y_W \\ z_W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_M f_{11} + y_M f_{12} + z_M f_{13} + f_{14} \\ x_M f_{21} + y_M f_{22} + z_M f_{23} + f_{24} \\ x_M f_{31} + y_M f_{32} + z_M f_{33} + f_{34} \end{bmatrix} / s \quad (5-12a)$$

ここで、

$$s = x_M f_{41} + y_M f_{42} + z_M f_{43} + f_{44} \quad (5-12b)$$

である。

5.4 仮想スケーラーの表示

5-1-3 の処理手順により外部パラメータ行列 $\mathbf{M} = [\mathbf{R}' \mathbf{t}]$ が求まると, \mathbf{A} と \mathbf{M} よりプロジェクション行列 \mathbf{M}_{prj} とモデルビュー行列 \mathbf{M}_{mv} を計算する[16]. (付録 A 参照)

これらのマトリックス行列は, 元の画像の実スケーラーの上に仮想スケーラーを重ねて表示するためのものである.

第6章 評価実験

6.1 精度検証

精度検証には，チェックパターンボードの上方にカメラを配した Fig.19a の装置を用いる．Fig.19b に示すように，チェックパターンボードの左上のコーナーに世界座標系($O_w - X_wY_wZ_w$)の原点をとり，スケーラーの先端（チップまたはトゥ）をチェックパターンボードのコーナーに当てるようにして，計測を行う．コーナーは，Fig.19c に示すように，1～7 の7点とする．

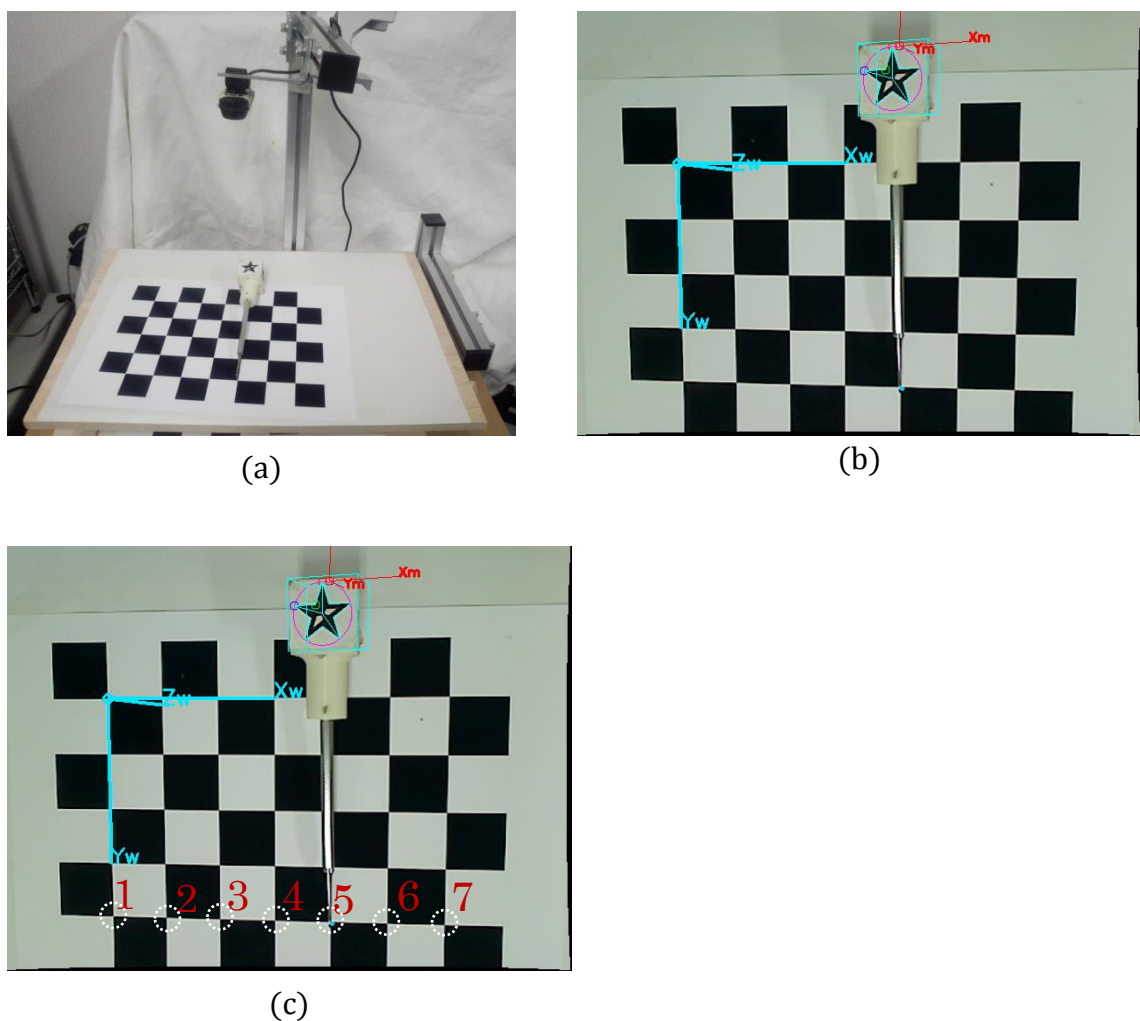


Fig. 19 精度検証，(a)実験装置，(b)チェックパターンボード，(c)サンプリングポイント．

ここで、世界座標系からカメラ座標系への 4×4 の変換行列を E_W ，マーカー座標系からカメラ座標系への 4×4 の変換行列を E_M とし，また，3 次元座標上の点 $P = [x \ y \ z]^T$ を同次座標表現 $\tilde{P} = [x \ y \ z \ 1]^T$ で表現し，世界座標系・カメラ座標系・マーカー座標系の点の同次座標表現を $\tilde{P}_W \cdot \tilde{P}_C \cdot \tilde{P}_M$ とすれば，以下の関係が成り立つ．

$$\tilde{P}_C = E_W \tilde{P}_W, \quad \tilde{P}_C = E_M \tilde{P}_M \quad (6-1)$$

すなわち，

$$s \tilde{P}_W = E_W^{-1} E_M \tilde{P}_M \quad (6-2)$$

実際に，スケーラーの先端位置 $\tilde{P}_M = [0 \ 6 \ -173.9 \ 1]^T$ を式(6-2)に適用し，その世界座標系の位置 \tilde{P}_W を求める．

精度検証の結果を Fig.20 に示す．ここで，横軸は 7 個のサンプリングポイント番号を，縦軸は真値との変位を mm の単位で表している．X 軸方向の変位 ΔX は青色，Y 軸方向の変位 ΔY は赤色，Z 軸方向の変位 ΔZ は緑色で表している．変位（誤差）の統計量を Table 4 に示す．ポイント 6・7 で ΔX が大きくなっているが，局所的なレンズ歪の影響と考えられる．しかしながら，実際的には，殆ど使用しないポイントでもある．

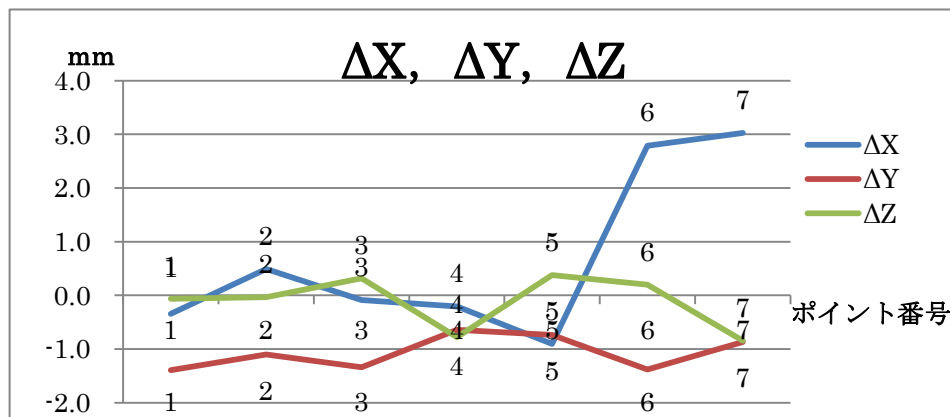


Fig. 20 サンプリングポイントにおける誤差

Table 4 誤差の統計量

	error (mm)			
	ΔX	ΔY	ΔZ	D
average	0.68	-1.07	-0.12	1.81
RMS	1.61	1.11	0.48	2.01
variance	2.13	0.09	0.22	0.78
standard deviation	1.46	0.30	0.46	0.88

6.2 開発システムにおける実証実験

本システムを使用して、スケーラーの先端の動きがリアルタイムに表示できるかどうかの実験を行った。100 ミリ秒ごとに画像を取得し、録画を行った。5-1-3 の手順に従って、Fig.21b で示される世界座標系($O_w - X_w Y_w Z_w$)における先端位置を求めた。Fig.21b には仮想スケーラーが表示されているが、スケーラーの先端を含むワーキングエンドも表示されている。

Table 4 は、フレームごとのスケーラー先端の X, Y, Z 位置を示す。また Fig.22 は、その動きをグラフ化したもの、Fig.23 はフレームごとの画像である。上段は元の画像で、下段は仮想スケーラーを重ねて表示したものである。その動きは小さいが、Table 4 や Fig.22 で数値として見ることができる。

なお、提案システムは本 3-D 手法でスケーラーのワーキングエンドを可視化し、その位置は口内の接触位置を示すが、直接その位置を与えるものではない。接触位置を表示するには、顎及び歯を含めたモデルを構築する必要がある。

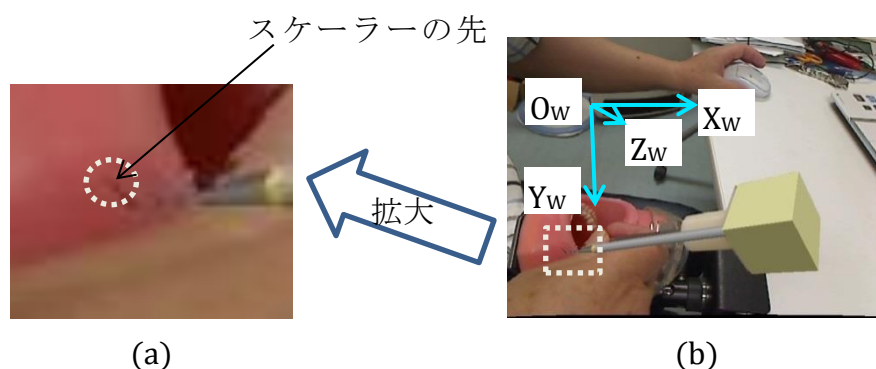


Fig. 21 世界座標系と仮想スケーラー

Table 5 先端位置の遷移

先端位置	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)
Frame_22	-18.3	107.0	-28.7
Frame_23	-18.2	106.2	-27.2
Frame_24	-19.5	107.3	-27.5
Frame_25	-20.2	107.1	-25.4
Frame_26	-19.9	107.8	-25.3
Frame_27	-18.5	107.3	-28.7
Frame_28	-18.1	106.4	-26.6
Frame_29	-17.9	105.0	-21.2
Frame_30	-19.2	106.8	-25.2

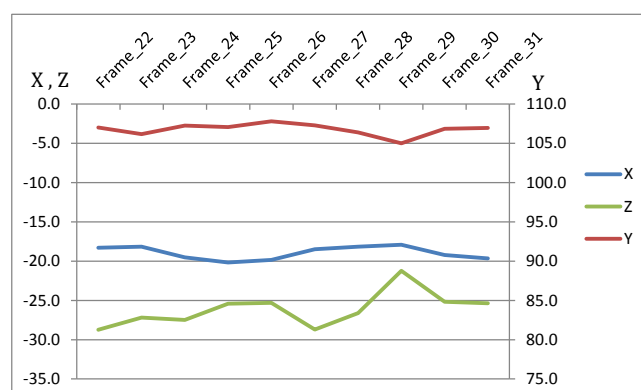
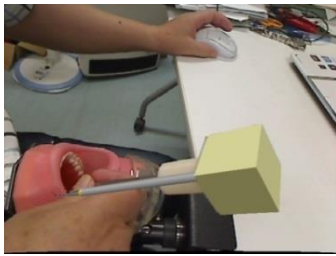
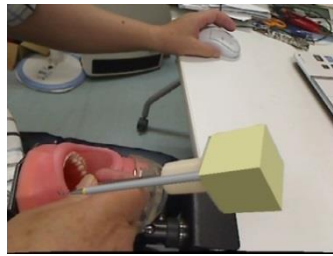


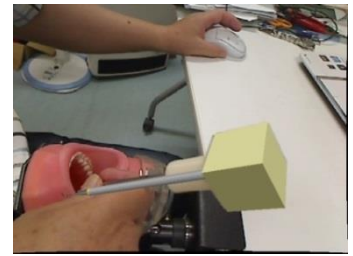
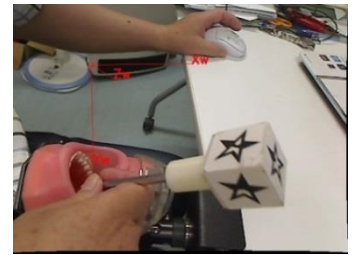
Fig. 22 先端位置の遷移



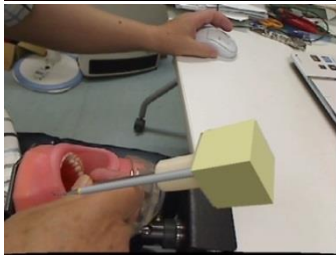
Frame_22



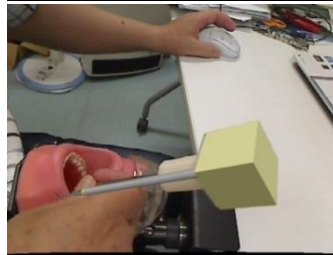
Frame_23



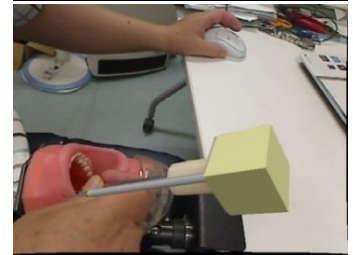
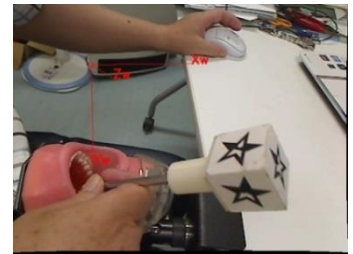
Frame_24



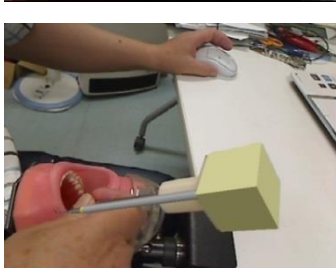
Frame_25



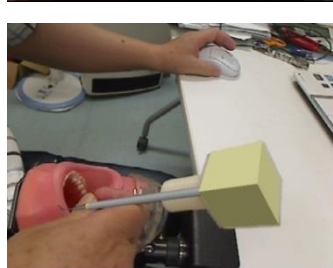
Frame_26



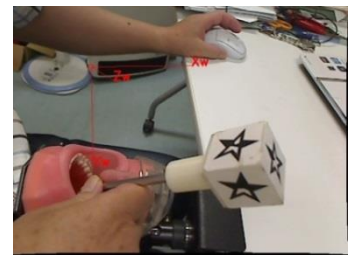
Frame_27



Frame 28



Frame 29



Frame 30

Fig. 23 フレームごとの画像. 上段は元の画像, 下段は仮想スケイラーを重ねた画像.

第7章 結言

7.1 結論

本研究では、コンピュータビジョンを利用して、スケーラーストロークの動きの可視化手法を提案した。仮想スケーラーを実スケーラーにリアルタイムに重ねあわせ、その動きをパソコンのディスプレイに表示した。従って、パソコンのディスプレイに表示された仮想スケーラーの動きを見て、指導教員が実習生（学生）を評価できるようになった。また、スケーラーの先端位置を3次元復元することによって、その動きを数値で評価できる可能性が示された。

本手法は、ビデオ画像取得のためにハンドヘルド、すなわち、携帯カメラを使用するという点でも、既存の方法と異なる。すなわち、スケーラーストロークの動きを観測するために、最良の位置にカメラを持っていくことができる。

7.2 今後の課題

3次元復元の要求精度は、約0.5 mm 以下である。提案システムは、Fig.15 に示したように、まだそれ以上の誤差を含むので、より高い精度がでるよう改良する必要がある。

また、3次元復元の範囲を歯や顎まで拡張できるようにし、歯面に対するスケーラーのワーキングエンドの動きを解析し評価できるシステムの構築が必要である。

最後に、スケーリング実習評価システムでは側方圧の評価も重要であり、歯面を押す力を計測できるスケーラーの開発も今後の課題である。

参考文献/参考資料

- [1] “歯周病：Wikipedia” (2014/12/5 アクセス),
<<http://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%AD%AF%E5%91%A8%E7%97%85>>
- [2] 富田幸代, 太田幹夫, 渋谷義宏, 村本睦司, 黒岩恵, 河田英司, 山田了: “スケーリング・ルートプレーニングのシミュレーション教育用システムの開発”, 日本歯周病学会会誌, Vol. 50, No. 4 pp.269-277 (2008).
- [3] 榊原悠紀田郎ほか: “新歯科衛生士教本 歯科予防処置”, 医薬出版, (1995).
- [4] 東京歯科大学歯周病学講座: “歯周療法学実習指針”, (2008).
- [5] “歯科用語辞典詳細『永久歯』” (2014/12/5 アクセス),
<<http://www.ringo-sika.com/jiten/hanosyurui.html>>
- [6] “歯科用語辞典詳細『歯の位置「頬側・唇側・口蓋側・舌側・近心・遠心」』” (2014/12/5 アクセス), <<http://www.ringo-sika.com/jiten/iti.html#03>>
- [7] 堀田正人: “臨床シミュレーションシステムによる切削実習教育について”, 人間工学, Vol. 31 No. 2 pp.105-109 (1995).
- [8] 株式会社モリタ製作所: “医療実習装置及び医療実習結果の表示方法”, 特許第 3790638 号, (2006).
- [9] 株式会社モリタ製作所: “再構成画像による歯科実習方法, 歯科実習システム, この方法を実現するプログラムを記録した記録媒体, 及び, 再構成画像による歯科表示システム, このシステムを実現するプログラムを記録した記録媒体”, 特許第 3720221 号, (2005).
- [10] 加藤博一: “拡張実現感システム構築ツール ARToolKit の開発”, 電子情報通信学会技術研究報告.PRMU, パターン認識・メディア理解 101(652), pp.79-86, (2002-02-14).
- [11] 橋本直: “3D キャラクターが現実世界に誕生! AR Tool Kit 拡張実現感プログラミング入門”, アスキー出版, (2008).
- [12] 奈良先端科学技術大学院大学 OpenCV プログラミングブック制作チーム: “OpenCV プログラミングブック第 2 版”, 毎日コミュニケーションズ, (2009)
- [13] 株式会社恵夢工房: “位置姿勢推定マーク, およびこれを用いた位置姿勢推定装置”, 特願 2011-265338, (2011).
- [14] “Ramer-Douglas-Peucker algorithm : Wikipedia” (2014/12/5 アクセス),
http://en.wikipedia.org/wiki/Ramer%E2%80%93Douglas%E2%80%93Peucker_algorithm
- [15] Z. Zhang : “A flexible new technique for camera calibration”, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Volume 22 Issue 11, pp.1330-1334,

(November 2000).

- [16] E. Lengyle : “ゲームプログラミングのための 3D グラフィックス数学”, pp.97-100(2009).
- [17] G. Bradski, A. Kaehler, 松田晃一(訳) : “詳解 OpenCVーコンピュータビジョンライブラリを使った画像処理・認識”, ㈱オイラリー・ジャパン, (2009)
- [18] D. C. Brown : “Close-range camera calibration.”, Photogrammetric Engineering, Vol.37, pp.855-866(1966)

謝辞

2009年度に、九州工業大学大学院工学府博士後期課程機械知能工学専攻に入学して以来、ご丁寧なご指導ご鞭撻をたまわりました九州工業大学大学院工学研究院機械知能工学研究系教授 石川 聖二博士・同准教授 タン ジュークイ博士に心から感謝申し上げます。

また、本論文の審査に際してご指導賜りました、本学大学院工学研究院電気電子工学研究系教授 芹川 聖一博士・本学大学院工学研究院機械知能工学研究系教授 田川 善彦博士・同教授 金 亨燮博士に厚く感謝を申し上げます。

また、本研究を行うきっかけを賜りました東京歯科大学名誉教授 山田 亨博士・稲毛デンタルクリニック 太田 幹夫博士・株式会社ユニスン代表取締役 村本睦司様、歯科系の計測装置の共同研究を通じてご協力を頂きました長崎大学大学院工学研究科システム科学部門機械科学分野准教授 矢澤 孝哲博士、また、タン・石川研究室の皆様に感謝申し上げます。

最後に、本研究を進めるにあたり、いつも励ましてくれた妻 昌代に感謝します。

付録 A CG 描画アプリケーションに対するカメラパラメータの設定

カメラで撮影した画像に，幾何学的に一致した仮想スクリーンを重ね合わせて表示させるには，本研究の座標系の下で算出されたカメラパラメータ（内部パラメータ行列や外部パラメータ行列）を CG 描画アプリケーション（本研究では OpenGL を採用）のモデルビュー行列やプロジェクション行列（透視射影行列）に設定する必要がある．

Fig. A-1 に示すように，本研究では，画像平面はカメラ座標系の Z 軸正側に配置されている．画像座標系は，画像の左上が原点となる．また，画像の幅を w ，高さを h とする．

カメラ座標における点 $\mathbf{P} = [P_X \ P_Y \ P_Z]^T$ と画像座標における点 $\mathbf{p} = [u \ v \ 1]^T$ との関係は次式で表すことができる．

$$s \mathbf{p} = \mathbf{A} \mathbf{P} \quad (\text{A-1})$$

ここで， \mathbf{A} は次式で与えられるカメラの内部パラメータ行列を表す．

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \alpha_u & 0 & u_0 \\ 0 & \alpha_v & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A-2})$$

式(A-1)，(A-2)より

$$u = \alpha_u \frac{P_X}{P_Z} + u_0, \quad v = \alpha_v \frac{P_Y}{P_Z} + v_0 \quad (\text{A-3})$$

が得られる．

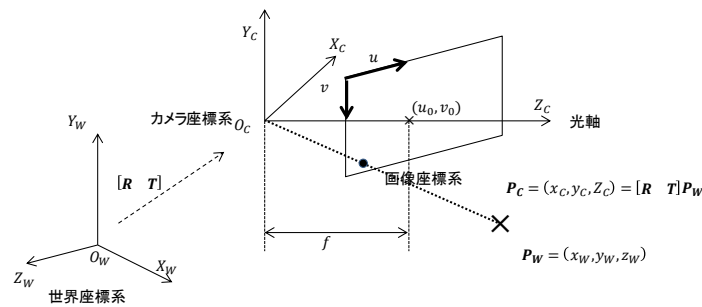


Fig. A-1 本研究における座標系

深度情報を保持しながら uv 座標を射影平面上の正しい位置に表示する透視射影を実現するためには、Fig. A-2 に示されるように、近平面と遠平面にはさまれた視錐台を、クリップ空間と呼ばれる立方体に写像する必要がある。クリップ空間は、立方体の中心に原点 (O_{crp}) があり、その大きさは、 $X_{crp}, Y_{crp}, Z_{crp}$ の各軸について -1 から 1 の範囲にある。

まず、視錐台における近平面や遠平面と平行な平面 γ のクリップ空間への変換を考える。

Fig.A-3 に示されるように、平面 γ において、 uv 座標系から xy 座標系への変換は次式で表される。

$$x = u - u_0, \quad y = v_0 - v \quad (A-4)$$

次に、平面 γ の xy 座標系からクリップ空間上の平面 δ への座標系 $x'y'$ の変換は

$$x' = (x + u_0) \frac{2}{w} - 1, \quad y' = (y + (h - 1 - v_0)) \frac{2}{h} - 1 \quad (A-5)$$

で表される。式(A-3), 式(A-4), 式(A-5)より

$$x' = \frac{2\alpha_u}{w} \frac{P_X}{P_Z} + \left(\frac{2}{w} u_0 - 1\right) \quad (A-6)$$

$$y' = \frac{-2\alpha_v}{h} \frac{P_Y}{P_Z} + \left(\frac{2}{h} (h - 1 - v_0) - 1\right) \quad (A-7)$$

が得られる。

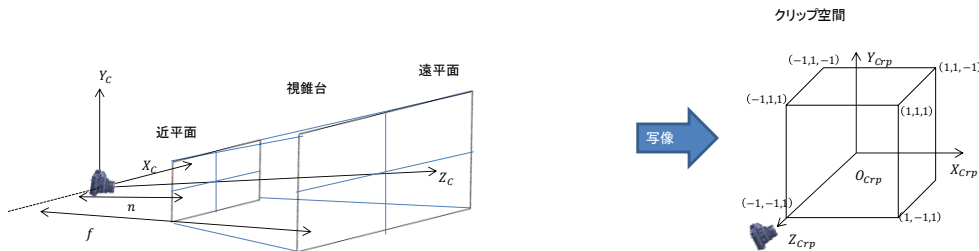


Fig. A-2 視錐台とクリップ空間

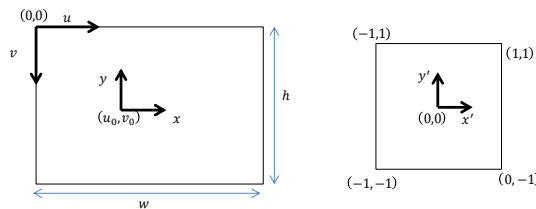


Fig. A-3 画像面のクリップ空間への投影

射影後の深度値を範囲[-1,1]に写像するには、 $n \rightarrow -1$, $f \rightarrow 1$ と写像する関数を次のように定義する.

$$z' = \frac{a}{z} + b \quad (\text{A-8})$$

$$a = \frac{-2f \cdot n}{f-n}, b = \frac{f+n}{f-n} \quad (\text{A-9})$$

従って、 z 座標は次式で与えられる関数によって範囲[-1,1]に写像される.

$$z' = a \left(\frac{1}{P_Z} \right) + b \quad (\text{A-10})$$

式(A-6), (A-7), (A-10)より

$$x' P_Z = \frac{2\alpha_u}{w} P_X + \left(\frac{2}{w} u_0 - 1 \right) P_Z \quad (\text{A-11})$$

$$y' P_Z = \frac{-2\alpha_v}{h} P_Y + \left(\frac{2}{h} (h - 1 - v_0) - 1 \right) P_Z \quad (\text{A-12})$$

$$z' P_Z = a + b P_Z \quad (\text{A-13})$$

従って、透視射影行列は次式で与えられる.

$$\mathbf{M}_{prj} = \begin{bmatrix} \frac{2\alpha_u}{w} & 0 & \frac{2}{w} u_0 - 1 & 0 \\ 0 & \frac{-2\alpha_v}{h} & \frac{2}{h} (h - 1 - v_0) - 1 & 0 \\ 0 & 0 & b & a \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{A-14})$$

この透視射影行列は、カメラ座標系をクリップ空間に変換しているので、モデルビュー行列は、外部パラメータ行列を 4×4 の行列に拡張したものを設定する. すなわち,

$$\mathbf{M}_{mv} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} & \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{A-15})$$

ここで、 \mathbf{R} は回転行列、 \mathbf{t} は並進ベクトル、 $\mathbf{0} = [0 \ 0 \ 0]^T$ である.